

# GUIA DE ONDAS ACÚSTICAS (BOCINAS): GENERALIDADES

JOAQUÍN CASTILLO<sup>1</sup> y ALEJANDRO COSTA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Estudiante de Ingeniería Electrónica, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba (UTN. FRC),  
Maestro López Esq. Cruz Roja Argentina. CP X5016ZAA. Córdoba, Argentina.  
castillojoaquin@gmail.com, costa.alejandro@hotmail.com

Resumen – *Para radiar energía sonora de manera eficiente y con un cierto grado de direccionalidad existen varios métodos. Históricamente uno de los más utilizados, ya sea como complemento de un sistema ó como elemento radiador pasivo final, es la guía de onda ó bocina. En este trabajo, se analiza el principio de funcionamiento y características acústicas de tipos más utilizados.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Un diafragma de gran superficie tiene una impedancia de radiación que tiende a ser más resistiva, dentro de una gama de frecuencias, en comparación con la de un diafragma de menor superficie. Como resultado, se radia más potencia en frecuencias bajas con una determinada velocidad de volumen de aire. Pero utilizar un diafragma de gran superficie tiene muchas desventajas, como por ejemplo, las dimensiones, el aumento de masa, bajo rendimiento.

Las bocinas aumentan la eficiencia y el ancho de banda del sistema sin necesidad de aumentar la superficie del diafragma [4].

El trabajo está organizado de la siguiente manera: en primer lugar, se estudia el principio de funcionamiento y los propósitos de las bocinas; en segundo lugar, se analizan los modelos, tanto finito como infinito, y las bases teóricas; por último se realiza un análisis de las bocinas y tipos más utilizados.

## 2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

La bocina acústica es una guía de ondas en la que se lleva a cabo una transición suave de impedancia acústica entre la garganta y la boca. Debido a su gran área, la boca permite una radiación eficiente de la energía en el fluido que la rodea y por lo tanto, reduce al mínimo la reflexión posterior a la garganta. La direccionalidad de la radiación de energía es controlada por la forma del frente de onda en la boca y también por su periferia a través del fenómeno de difracción. Es entonces la bocina un adaptador de impedancias acústicas entre la unidad motriz de compresión (UMC) y el medio [2].

## 3. PROPOSITOS

Son dos los propósitos para los que se han utilizado históricamente a las bocinas: a) constituir

una adaptación de impedancia acústica adecuada entre el altavoz y el fluido; b) poder controlar la directividad [3].

### 3.1 Carga del altavoz

El altavoz, que es el generador de presión, posee una impedancia de fuente interna que controla una impedancia de carga externa. Esta impedancia externa es la impedancia del aire, que es baja debido a su baja densidad. Por otro lado, la impedancia de fuente de cualquier altavoz es elevada, por lo que existirá una importante desadaptación de impedancias entre la UMC y la carga [3].

El resultado es que gran parte de la energía colocada para ser radiada no alcanzará al fluido y en consecuencia será convertida en calor dentro de la unidad. Este problema se magnifica en bajas frecuencias donde el tamaño de la UMC es pequeño en comparación con la longitud de onda que debe radiar. Para altas frecuencias, la radiación de energía es en forma de frente de onda plano. Esto se debe a que la impedancia del aire vista desde la UMC es muy elevada, y comparable con su propia impedancia, aumentando la eficiencia del sistema [3].

### 3.2 Control de directividad

La directividad de un diafragma está determinada por las dimensiones del mismo, y en baja frecuencia no es posible controlarla debido a las difracciones. Al aumentar la frecuencia, aumenta la directividad. Las paredes de una bocina restringirán el esparcimiento de las ondas sonoras colocando más energía en una zona que en otra, aumentando la directividad del elemento radiador [3].

Esto es muy importante en sistemas de refuerzo sonoro, ya que se desea una distribución uniforme de presión sonora en bajas y altas frecuencias. Cuando se sonoriza espacios cerrados ó semicerrados debe considerarse las reflexiones tempranas y tardías que ocurren en el mismo [3].

## 4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Los fundamentos teóricos de las bocinas aún no han sido desarrollados con rigor analítico, sino que se basan en ciertas suposiciones y simplificaciones que entregan información muy útil sobre su comportamiento [3]. La propagación del sonido en una bocina se rige por la ecuación de onda en tres dimensiones (1):

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} - c^2 \left( \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (1)$$

Donde  $c$  es la velocidad del sonido,  $\Phi$  es el potencial de velocidad [3] y  $t$  es el tiempo.

### 4.1 Ecuación de Webster

Resolver la ecuación (1) puede ser muy complicado cuando se utiliza la guía de onda. En 1919, Webster propuso las siguientes suposiciones para simplificar la misma [3]:

- Amplitud infinitesimal: la amplitud de presión sonora es insignificante comparada con la presión del aire alrededores.
- El medio se considera como un fluido uniforme.
- No se tiene en cuenta la viscosidad y la fricción.
- No existen fuerzas externas en el medio.
- El movimiento es irrotacional.
- Las paredes de la bocina son rígidas y suaves.
- La presión es uniforme en el frente de onda.

Al cumplirse estas simplificaciones, la ecuación de onda requiere que el frente de onda sea función de la distancia  $x$  solamente. Esto significa que el centro de curvatura del frente de onda no puede cambiar. A estas bocinas las llama “*de un parámetro*” (1P) [3] y verifican la siguiente ecuación:

$$\frac{d^2 \Phi}{dx^2} + \frac{d \ln S d\Phi}{dx} - k^2 \Phi = 0 \quad (2)$$

Donde es  $k = \frac{2\pi f}{c}$ , es el número de onda,  $S$  es el área de la sección transversal de la bocina en función de  $x$  y  $\Phi$  es el potencial de velocidad [3].

La ecuación (2) se conoce como “ecuación de Webster” ó ecuación de la bocina. La solución de la misma es de la forma:

$$\Phi = Au + Bv \quad (3)$$

Donde  $A$  representa la onda saliente y  $B$  la onda reflejada. Entonces, la solución de la ecuación de onda (3) está dada en términos de la impedancia acústica absoluta:

$$Z_A = \frac{\rho_0 c}{S_t} \quad (4)$$

Siendo  $\rho_0$  la densidad del aire y  $S_t$  la sección de la garganta [3].

En la Figura 1, se indican las partes de una bocina. Siendo  $S_T$  el área de la garganta,  $S_M$  el área de la boca, y  $S(x)$  la sección dentro de la bocina en función de la distancia axial de la misma [4].

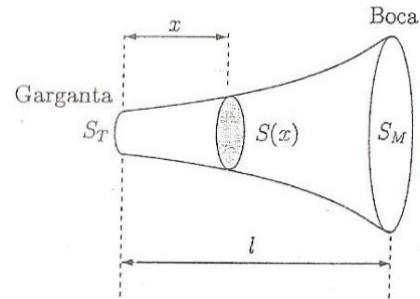


Figura 1: constitución de una bocina [4].

### 4.2 Ensanchamiento y factor de forma

La ecuación de Webster puede desarrollarse para obtener la siguiente ecuación:

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{1}{4S(x)^2} \left( \frac{\partial(S(x)^2)}{\partial x} - 2S(x) \frac{\partial S}{\partial x^2} \right) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) p \sqrt{S(x)} = 0 \quad (5)$$

La misma puede resolverse fácilmente si el segundo término del primer factor del lado izquierdo de la ecuación es una constante, es decir:

$$\frac{1}{4S(x)^2} \left( \frac{\partial(S(x)^2)}{\partial x} - 2S(x) \frac{\partial S}{\partial x^2} \right) = -\frac{m^2}{4} \quad (6)$$

Donde  $m$  es el ensanchamiento, definido como el ritmo de cambio de la sección  $S_x$  con la distancia  $x$ . Las bocinas que satisfacen esta condición pertenecen a la familia denominada Salmon. Para un  $m$  no nulo, la solución de la ecuación Webster es [4]:

$$S(x) = S_T (\cosh \frac{mx}{2} + M \operatorname{senh} \frac{mx}{2})^2 \quad (7)$$

Donde  $M$  es el factor de forma de la bocina. Tanto  $m$  como  $M$ , definen el tipo de bocina en la familia Salmon [4].

Algunas de estas bocinas con sus parámetros  $m$  y  $M$  se representan en la Tabla 1.

Tipo	$m$	$M$
Cónica	0	-
Catenoidal	$> 0$	0
Hiperbólica	$> 0$	$0 < M < 1$
Exponencial	$> 0$	1

Tabla 1: valores de  $m$  y  $M$  que definen los tipos de bocina de la familia Salmon [4].

### 4.3 Frecuencia de corte

Las bocinas exponenciales e hiperbólicas poseen un corte a una determinada frecuencia. Por debajo de la misma, la bocina no transmite sonido y la impedancia es reactiva pura [3].

Una onda plana que se propaga por un tubo, no presenta ninguna variación en el frente de onda. Por lo tanto, la impedancia normalizada es uniforme e igual a la unidad en todo el tubo. En cambio, la propagación de una onda esférica posee una impedancia acústica que varía con la frecuencia y la distancia desde la fuente [3].

Cuando la distancia es  $\lambda/2\pi$ , la parte reactiva y resistiva de la impedancia son iguales. Por encima de la misma, predomina la parte resistiva [3].

La diferencia entre ambos casos es que las partículas de aire en una onda esférica que se propaga, se alejan entre sí. El frente de onda se agranda y se introduce reactancia en el sistema debido a dos factores: la presión en el sentido de avance y la presión en el sentido esférico [3].

La presión en el sentido de avance es la que genera la parte resistiva de la impedancia. La segunda, le quita energía a la primera y como resultado se entrega cada vez menos energía sonora al medio, conformando la parte reactiva de la impedancia [3].

En la Figura 2 puede observarse la variación de la parte resistiva y reactiva de la impedancia acústica de varios tipos de bocinas en función de la frecuencia [3].

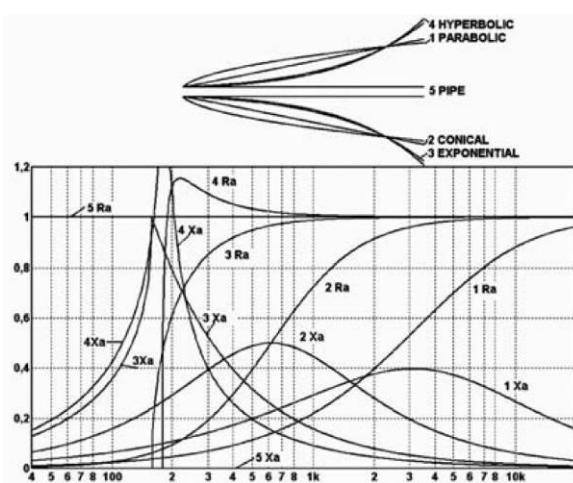


Figura 2: Variación de la parte resistiva y reactiva de la impedancia de distintas bocinas de la familia Salmon [3].

## 5. TIPOS DE GUIAS DE ONDA (BOCINAS)

### 5.1 Bocina infinita

En una bocina infinita no existe onda reflejada, por lo que en la ecuación (3) se da que  $B=0$  y  $A=p_{\max}$ . La presión es:

$$p(x, t) = p_{\max} e^{j\omega t} e^{-(\alpha + j\beta)x} \quad (8)$$

Y la velocidad de las partículas en función de la distancia  $x$  es:

$$v(x, t) = \frac{-1}{\rho_0} \int \frac{\partial p}{\partial x} dt = \frac{\alpha + j\beta}{j\omega \rho_0} p_{\max} e^{j\omega t} e^{-(\alpha + j\beta)x} \quad (9)$$

El cociente de la fuerza  $f_{(x)}=p_{(x)}S_{(x)}$  y la velocidad de las partículas  $v_{(x)}$  proporcionan el valor de la impedancia mecánica en la posición  $x$  [4]:

$$Z_M(x) = S_t \rho_0 C e^{mx} \left( \sqrt{1 - \frac{m^2}{4k^2}} + j \frac{m}{2k} \right) = R_M(x) + jX_M(x) \quad (10)$$

Que expresada como impedancia acústica queda:

$$Z_A(x) = \frac{\rho_0 C}{S_t e^{mx}} \left( \sqrt{1 - \frac{m^2}{4k^2}} + j \frac{m}{2k} \right) = R_A(x) + jX_A(x) \quad (11)$$

Se pueden dar tres casos según el valor del radicando:

- Alta frecuencia:  $(m/2k) < 1$  donde la impedancia mecánica queda:

$$Z_M(x) \cong S_t \rho_0 C e^{mx} = R_M(x) \quad (12)$$

- Frecuencia de corte:  $(m/2k) = 1$  y  $Z_M$

$$Z_M(x) = j S_t \rho_0 C e^{mx} = j X_M(x) \quad (13)$$

- Baja frecuencia:  $(m/2k) > 1$  en este caso  $Z_M$  es imaginaria y por lo tanto no existe radiación sonora:

$$Z_M(x) = j S_t \rho_0 C e^{mx} \left( \frac{m}{2k} - \sqrt{\frac{m^2}{4k^2} - 1} \right) \quad (14)$$

La impedancia acústica que presenta la garganta  $Z_{AT}$  y la boca  $Z_{AM}$  de la bocina se calcula a partir de la ecuación (4):

$$Z_{AT} = \frac{\rho_0 c}{S_T} \quad (15)$$

$$Z_{AM} = \frac{\rho_0 c}{S_M} \quad (16)$$

Relacionando ambas expresiones se obtiene:

$$Z_{AT} = \frac{S_M}{S_T} Z_{AM} \quad (17)$$

Donde puede observarse que la bocina es un adaptador de impedancias [4].

Para frecuencias muy por encima de la de corte, cualquier bocina se comporta como infinita, debido a la directividad que poseen las ondas de alta frecuencias [4].

### 5.2 Bocina finita

Una bocina real tendrá siempre una longitud finita, y por lo tanto, existirá una onda reflejada que hará variar la impedancia de la misma. Considerando dicha reflexión, la impedancia resulta ser [4]:

$$Z_M(x) = \frac{S(x) \rho_0 C k (A e^{-j\beta x} + B e^{j\beta x})}{(\beta - j\alpha) A e^{-j\beta x} - (\beta + j\alpha) B e^{j\beta x}} \quad (18)$$

Tomando  $x=0$  y  $x=l$  de la ecuación anterior, se encuentra la impedancia mecánica de la garganta  $Z_{MT}$  en función de la impedancia mecánica de la boca  $Z_{MM}$  [4]:

$$Z_{MT} = S_T \rho_0 c \left( \frac{Z_{MM} \cos(\beta l + \theta) + j S_M \rho_0 c \sin(\beta l)}{S_M \rho_0 \cos(\beta l - \theta) + j Z_{MM} \sin(\beta l)} \right) \quad (19)$$

donde  $\theta = \arctg(\alpha/\beta)$ .

El problema en las bocinas reales o finitas es el tamaño físico, que determina el ancho de banda que la misma puede radiar con eficiencia [4].

Los factores que caracterizan el ancho de banda de una bocina son:

- $f_C$  proporcional a  $m$ : cuanto mayor sea el valor de  $m$ , es decir, a medida que se abre más la bocina, la frecuencia de corte aumenta.
- Rizado proporcional a  $l$  y el diámetro: cuanto sean mayor estos valores, menor rizado presenta la respuesta. Esto puede observarse en la Figura 3.

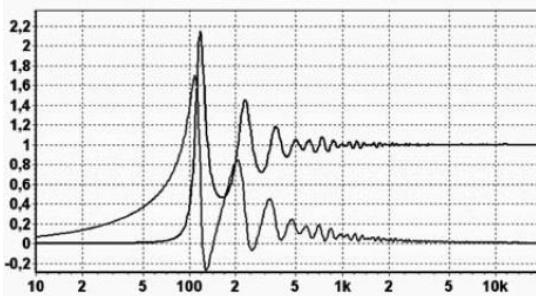


Figura 3: Variación de la longitud de una bocina exponencial de 75 Hz [3].

## 6. FAMILIAS DE BOCINAS

### 6.1 Familia Salmon

#### 6.1.1 Parabólica y tubo

Las dos bocinas son verdaderas bocinas 1P. El tubo infinito de sección transversal uniforme actúa como una resistencia pura igual a la ecuación (4) [3]. El tubo de gran longitud y adecuadamente amortiguado se comporta, en una banda ancha de frecuencias, como una impedancia resistiva. Este comportamiento, que asemeja a una bocina perfecta, es utilizado para realizar pruebas a las UMC [3].

La bocina parabólica es rectangular con dos lados paralelos, mientras que los dos restantes se expanden linealmente, en donde el frente de onda son cilindros concéntricos. La sección responde a la siguiente ecuación [3]:

$$S = S_t x \quad (20)$$

#### 6.1.2 Cónica

Es una bocina del tipo 1P en coordenadas esféricas. El área transversal del frente de onda esférico de una bocina cónica simétrica respecto al eje axial es [3]:

$$S = \Omega(x + x_0)^2 \quad (21)$$

Donde  $x_0$  es la distancia desde el vértice a la garganta, y  $\Omega$  es el ángulo sólido del cono. Si se conoce la mitad del ángulo  $\theta$  del cono [3]:

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos\theta) \quad (22)$$

Para calcular la sección transversal a una distancia  $x$  desde la garganta:

$$S(x) = S_t \left( \frac{x+x_0}{x_0} \right)^2 \quad (23)$$

La impedancia de la garganta para una bocina cónica infinita es:

$$Z_A = \frac{\rho_0 c}{S_t} \left( \frac{k^2 x_0^2 + j k x_0}{1 + k^2 x_0^2} \right) \quad (24)$$

Como se puede observar en la Figura 2, la resistencia de este tipo de bocinas crece lentamente. La frecuencia a la cual la resistencia de la garganta alcanza un valor asintótico depende del ángulo sólido  $\Omega$ . Por lo tanto para lograr una buena adaptación de impedancias a bajas frecuencias, la bocina debe abrirse suavemente [3].

También se debe tener en cuenta que existe un área de boca mínima para minimizar las reflexiones hacia la garganta. Es decir, si se necesita una bocina cónica para ser utilizada en baja frecuencia, la misma debe ser muy larga para asegurar el área antes mencionada. Por esta razón, este tipo de bocinas no son utilizadas para trabajar con frecuencias bajas en las cuales se necesita una buena adaptación de impedancias, son de utilidad en aplicaciones para el control de la directividad [3].

#### 6.1.3 Exponencial

La bocina exponencial no es una bocina del tipo 1P, por lo que no se puede predecir su desempeño con exactitud. La impedancia de la garganta de una bocina exponencial infinita es [3] [4]:

$$Z_A = \frac{\rho_0 c}{S_t} \left[ \sqrt{\left(1 - \frac{m^2}{4k^2}\right)} + j \frac{m}{2k} \right] \quad (25)$$

Como se muestra en la Figura 2, la resistencia de la garganta se incrementa rápidamente luego de la frecuencia de corte. Por lo que, la bocina carga a la UMC a una frecuencia mucho menor que la correspondiente a una bocina cónica [3].

La sección de una bocina exponencial responde a la siguiente fórmula:

$$S = S_t e^{mx} \quad (26)$$

#### 6.1.4 Hiperbólica

También es conocida como bocina “hypex” y responde a la ecuación (7). Para obtener esta bocina, el factor de forma  $M$  puede variar entre 0 y 1. Cuando  $M=0$  se tiene una bocina catenoidal y cuando  $M=1$  una exponencial [3].

Por encima de la frecuencia de corte, la impedancia de la garganta es:

$$Z_A = \frac{\rho_0 c}{S_t} \left( \frac{\sqrt{1 - \frac{1}{\mu^2}}}{1 - \frac{1-M^2}{\mu^2}} + j \frac{M}{1 - \frac{1-M^2}{\mu^2}} \right) \quad (27)$$

Donde  $\mu$  es la frecuencia normalizada  $f/f_c$ .

Esta bocina posee una buena respuesta en baja frecuencia, comparada con otras bocinas, debido a que varía lentamente cerca de la garganta. Como puede observarse en la Figura 2, es la que menor frecuencia de corte posee dentro de la familia Salmon [3].

Las bocinas hiperbólicas más utilizadas son las que se poseen un  $M$  entre 0,5 y 1 debido a su mejor adaptación de impedancias [3].

## 6.2 Otras bocinas

### 6.2.1 Tractrix

Este tipo de bocina está constituida por la revolución de una curva tractriz. Dicha curva responde a la siguiente ecuación [3]:

$$x = r_m \ln \frac{r_m + \sqrt{r_m^2 - r_x^2}}{r_x} \quad (28)$$

Donde  $r_m$  es el radio de la boca, usualmente tomado como:

$$\frac{\lambda_c}{2\pi} = \frac{c}{2\pi f_c} \quad (29)$$

Donde  $f_c$  es la frecuencia de corte de la bocina, y  $r_x$  es el radio de la bocina a una distancia  $x$  desde la boca [3].

La hipótesis de este tipo de bocinas es que la onda se propaga a través de la bocina como frente de ondas esféricos con radio constante  $r_m$ . Para que se cumpla dicha hipótesis, el frente de onda debe ser esférico para todas las frecuencias, así como, la velocidad de la onda, a través de la bocina [3].

Bajo estas hipótesis, el trabajo de Lambert dió como resultado que el frente de onda cercano a la boca era similar a una onda esférica y que la directividad aumentaba con la frecuencia. Esto dio como conclusión que la bocina tractrix no presenta un frente de onda hemisférico para todas las frecuencias, solo lo hace en bajas frecuencias [3].

En la Figura 4 se muestra las dimensiones de una bocina tractrix y el frente de onda [3].

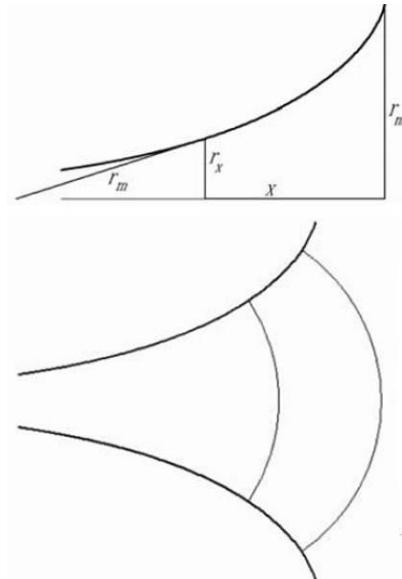


Figura 4: dimensiones de la bocina Tractrix (arriba), frente de onda en la bocina (abajo) [3].

### 6.2.2 De onda esférica

Inventada por Klangfilm (1940) en Siemens, muy similar a la bocina tractrix y basada en la misma hipótesis. El área del frente de onda crece exponencialmente [3]. El cálculo del área de la garganta según la Figura 5 (arriba) responde a la siguiente fórmula:

$$S_o = 2\pi r_o h_o \quad (30)$$

Además, en la Figura 5 (abajo) se pueden observar dos tipos de bocinas de onda esférica las cuales pueden lograr grandes aperturas de la boca de la bocina [3].

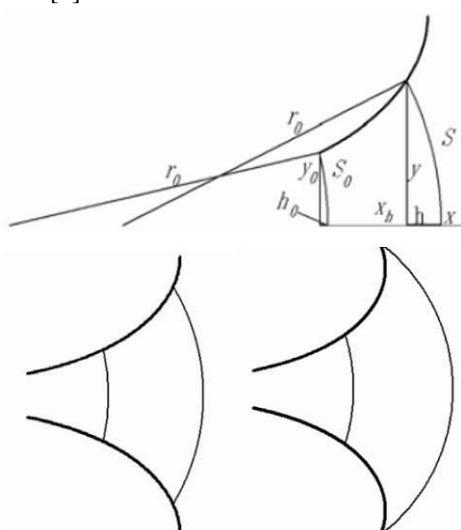


Figura 5: Dimensiones de una bocina de onda esférica (arriba). Bocinas de onda esférica (abajo) [3].

### 6.2.3 Multicelular

Una bocina multicelular consiste en la división de una bocina en celdas individuales, cada una de las

cuales presenta un ensanchamiento determinado. El resultado de una boca dividida da una directividad por encima de una frecuencia que es función del número de celdas y de su ensanchamiento. En la Figura 6 se puede observar una bocina de 2 x 5 celdas [4].

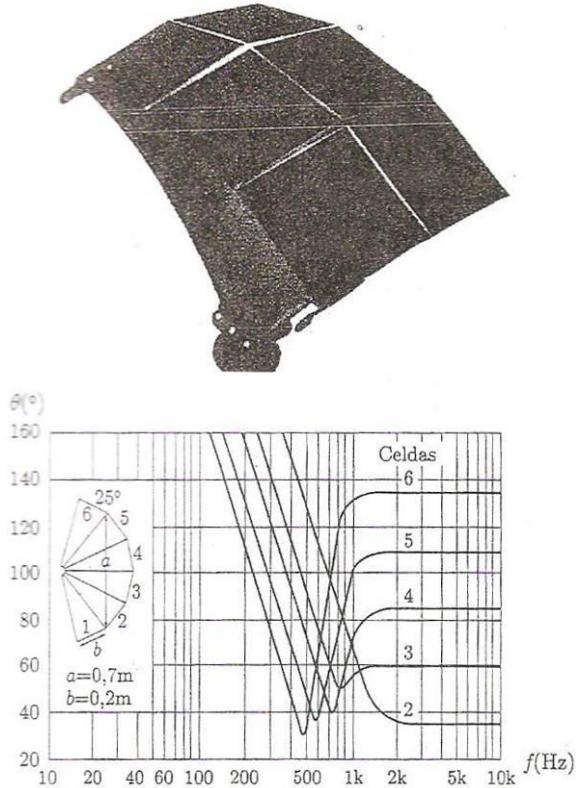


Figura 6: Bocina multicelular 2x5 (arriba) y directividad según la cantidad de celdas (abajo) [4].

El frente de onda que se propaga en el interior de cada celda es perpendicular a sus paredes de modo que, en conjunto, el frente de onda tiende a ser esférico. Por este motivo, la radiación en la dirección dentro del ángulo que forma la estructura multicelular es constante, mientras que la radiación es prácticamente nula en el resto de las direcciones [4].

En la Figura 6 (abajo) se representa la directividad de una bocina de 6 celdas horizontales de apertura 25 grados en la que se aprecia que el control por encima de 1 kHz está determinado por el número de celdas. En el rango comprendido entre 500 Hz y 1 kHz, existe un estrechamiento debido a que el conjunto de celdas se comporta como una bocina simple y, por tanto, se produce un mínimo cuando el ancho de la bocina es igual a la longitud de onda de la señal. A frecuencias más bajas la bocina pierde completamente el control de la directividad [4].

#### 6.2.4 Radiales

El crecimiento horizontal en este tipo de bocinas es del tipo cónica, mientras que el crecimiento vertical es exponencial. La directividad en el plano horizontal es mejor que una bocina multicelular [3].

En el sentido vertical no existe control en la directividad del frente de onda, y el ancho del haz se estrecha constantemente a medida que aumenta la frecuencia [3].

En la Figura 7 se puede observar las vistas horizontales y verticales de una bocina radial.

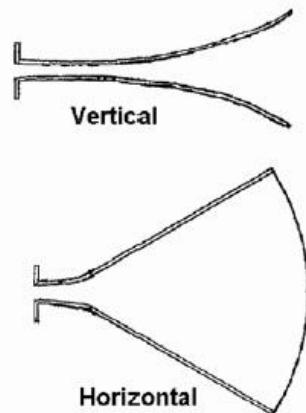


Figura 7: Bocina radial [3].

#### 6.2.4 CE

Este tipo de bocinas solucionan los inconvenientes de las bocinas multicelulares y radiales introduciendo una nueva clase de bocinas que proveen mejor adaptación de impedancias y una mejor directividad [3].

El principio se basa en introducir una garganta exponencial o hiperbólica, y una boca del tipo cónica. El ángulo sólido de la boca cónica es seleccionado de modo que tenga una óptima terminación con la garganta exponencial [3]. El radio de la bocina exponencial es:

$$r = \frac{0.95 \sin \theta}{k_c} \quad (31)$$

Donde  $r$  es el radio de la unión entre las bocinas,  $\theta$  es la mitad del ángulo del cono respecto al ángulo sólido  $\Omega$  [3]:

$$\theta = \cos^{-1}\left(1 - \frac{\Omega}{2\pi}\right) \quad (32)$$

Y  $k_c$  es el número de onda en la frecuencia de corte:

$$k_c = \frac{2\pi f_c}{c} \quad (33)$$

El problema del estrechamiento del rango medio es solucionado con una apertura más rápida cerca de la boca cónica de la bocina. Esto reduce el tamaño de la fuente acústica para el rango medio de frecuencias, eliminando el estrechamiento. Como resultado, se obtiene una bocina con buen control de directividad en la frecuencia que determina el tamaño de la boca [3].

Por ejemplo, para una bocina con  $40^\circ$  horizontales y  $20^\circ$  verticales de apertura (Figura 8), la frecuencia de corte vertical es cuatro veces más alta que la horizontal [3].

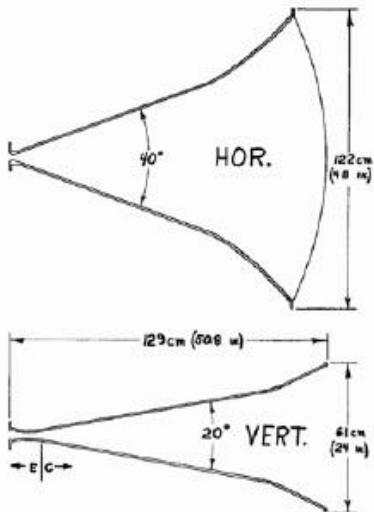


Figura 8: Bocina tipo CE con apertura de  $40^\circ$  horizontales y  $20^\circ$  verticales de apertura [3].

### 6.2.5 Mantarraya

Este tipo de bocinas soluciona el problema de las bocinas CE, las cuales tienen una dependencia entre el ángulo de apertura vertical con el horizontal. Para lograr un aumento en la directividad en bajas frecuencias en el plano vertical, posee un aumento de la dimensión en el mismo sentido [3].

En la Figura 9 se ilustra la geometría de este tipo de bocinas, en la cual se puede observar que la apertura vertical comienza mucho antes que la horizontal. En el punto donde comienza la segunda apertura horizontal, la onda se difracta, comienza a cubrir el ancho de la bocina al mismo tiempo que la dispersión es controlada por las paredes de la bocina [3].

Las bocinas mantarraya utilizan el mismo principio que las bocinas CE para evitar el estrechamiento en el rango medio, pero con la diferencia que no incorpora paredes con aperturas radiales. La razón es que las aperturas radiales producen reducción en el ancho de banda debido a una pérdida de energía hacia los costados en la parte alta del rango de frecuencias medias [3].

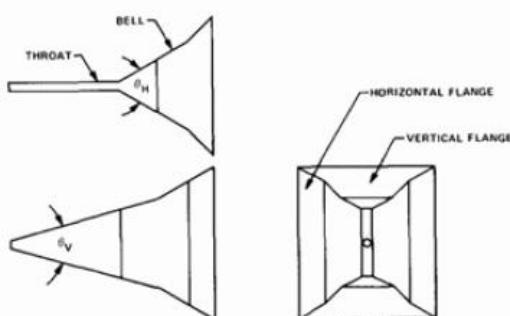


Figura 9: Bocina tipo manta raya [3].

## 7. CONCLUSION

Los altavoces de bocina combinan la alta eficiencia de un diafragma de grandes dimensiones con la masa reducida de un pequeño altavoz. Este efecto se produce acoplando el pequeño diafragma a una gran superficie radiante a través de un tubo de sección creciente. Por esta razón, la familia de bocinas, al contrario que los altavoces, entra dentro del grupo de "altavoces de radiación indirecta" que permiten alcanzar eficiencias del 10 al 50 % [4].

Una bocina es de hecho un transformador acústico. Trasforma un diafragma de pequeña área en un diafragma de gran área sin los inconvenientes de las resonancias del cono, adaptando las impedancias de la garganta y la boca en relación al medio que acopla [2].

Debido a su gran área, la boca permite una radiación eficiente de la energía en el fluido que la rodea y por lo tanto, reduce al mínimo la reflexión posterior a la garganta. La direccionalidad de la radiación de energía es controlada por la forma del frente de onda en la boca y también por su periferia a través del fenómeno de la difracción [2].

En el diseño de una bocina para una aplicación particular, se deben elegir los parámetros de modo de poder radiar la mayor potencia acústica posible, dentro de la gama de frecuencias de interés, con una distorsión alineal convenientemente baja. Una vez establecida la gama de frecuencias, la distorsión tolerable y la potencia radiada deseada, se puede seleccionar la unidad motora y calcular los diámetros de la garganta, la boca y la longitud y forma de la bocina [1].

## 8. REFERENCIAS

- [1] Beranek L. L. "Acústica". 2da Ed. Hispano, 1969.
- [2] Fahy Frank. "Foundations of Engineering Acoustics". Ed. Elsevier Ltd. Reino Unido. 2001.
- [3] Kolbrek Bjorn "Horn Theory: An Introduction, Part 1&2". AudioXpress, 2008
- [4] Ortega B. P., Romero M. R. "Electroacústica: Altavoces y Micrófonos". Pearson. España, 2003.

## DATOS BIOGRÁFICOS

**Castillo Joaquín**, nacido en Cutral-Có el 22/09/1985. Estudiante de ingeniería en electrónica, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba. Argentina. Sus intereses son: acústica de recintos, electroacústica. E-mail: 49536@electrónica.frc.utn.edu.ar

**Costa Alejandro**, nacido en Neuquén el 11/01/1985. Estudiante de ingeniería en electrónica, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba. Argentina. Sus intereses son: acústica de recintos, control de ruido, estudio de grabación. E-mail: 49535@electrónica.frc.utn.edu.ar